

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月 1日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560401

研究課題名（和文）一般化スプラインによる極近距離インパルス通信システム

研究課題名（英文）Short-range impulse radio system by means of generalized splines

研究代表者

鎌田 賢 (KAMADA Masaru)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号：70204609

研究成果の概要（和文）：極近距離の電子機器を結ぶためのデジタル通信のためのインパルス無線通信方式において、共振フィルタを階段状波形で駆動して得られる直交パルス波形が存在するための必要十分条件、パルス生成法・パルス検出法を明らかにした。米国 FCC の規制のもとでも 1 秒間に 60 億個伝送できるパルス波形の設計例が得られた。この速度は、現行方式の約 11 倍にあたる。パルス検出法の前提となる 2 階微分特性を有するアンテナ対を試作した。

研究成果の概要（英文）： For the impulse radio communications system connecting digital devices at very short distances, it has been clarified how to shape and detect orthogonal pulses generated through a resonance filter driven by a staircase waveform. A mathematical proof of their existence is established. A resulting example pulse would achieve the transmission rate to 6 billion pulses per second which is 11 times faster than the best existing one. A pair of antennas were prototyped of which operation is close to double differentiation in time.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：システム工学

科研費の分科・細目：工学・電気電子工学・システム工学

キーワード：インパルス通信, スプライン, UWB, 動的システム

## 1. 研究開始当初の背景

インパルス通信は、時間制限されたパルス波形を基本媒体として構成され、近距離に置かれたデジタル機器を高速に接続する用途で有望とされている。伝送波形は、1 ビットを 1 つのパルス波形に担わせて次々と送信することによって得られるパルス列となる。受信において、パルス列を成すパルス群の

各々を効率よく弁別できるために、パルス群は互いに直交していなければならない。

本研究は、互いに重なりあっても直交性を保つような高密度パルスの生成・検出法を可能にすることによって従来よりも高速な通信を可能にする方式を目指して開始された。

階段状波形でアナログ連続時間システム

を駆動すること生成される時間制限パルスが一般化スプラインになっていることに着目して、サンプル値制御理論とスプライン理論を道具立てとして採用した。また、送信アンテナから受信アンテナまでの伝送系が単純な2階微分であるならば検出が容易であることにも着目して、そのようなアンテナ対の存在性を確かめる実験も計画した。

## 2. 研究の目的

研究全体の目的は、線形動的システム理論に基づく一般化スプライン関数として生成されるパルス波形を用いて、極近距離高速デジタル無線通信システムを構築することである。

通常の無線通信が、正弦波を基本媒体にして構成されるのに対して、インパルス通信は、時間制限されたパルス波形を基本媒体として構成される。伝送波形は、1ビットを1つのパルス波形に担わせて次々と送信することによって得られるパルス列となる。受信において、パルス列を成すパルス群の各々を効率よく弁別できるように、パルス群は互いに直交していなければならない。パルス波形は周波数領域において極めて広い帯域をもつので、インパルス通信は **UWB (ultra-wide bandwidth, 超広帯域)**通信とも呼ばれている。その社会的な用途の例は、ケーブル接続しなくても近づけるだけで情報機器同士の高速度データ交換が行えることである。

最も初歩的なアプローチは、パルス群が互いに重ならないように1時間区間に1つだけのパルスを送信することである。この場合には、どのような時間制限パルスを用いても、パルス群は必ず互いに直交する。しかし、単位時間あたりのパルス数が少ないので、通信速度は遅い。

より進んだアプローチは、互いに直交する複数のパルスのセットを1時間区間に1セットだけ送信することである。通信速度が向上することに加えて、通信路の状況に適応してパルス形状を変えられるという利点もあるが、多様なパルスの送受信のために回路が複雑化する問題がある。

他のアプローチは、重なっても直交する性質をもつ直交ウェーブレット波形をパルスに選び、高密度で送信することである。このようなウェーブレットを用いることは、インパルス通信の研究が始まった当初から現在に至るまで様々な形で論じられている。しかし、インパルス通信へのウェーブレットの使用には決定的な問題がある。時間制限された直交ウェーブレットの波形は、デジタル計

算機上のアルゴリズムでは計算できるが、アナログ回路では生成できない。インパルス通信では1時間区間が0.1ナノ秒程度に想定されているので、デジタル・オーバーサンプリング等のテクニックでウェーブレット波形を生成するならば、1ピコ秒から10ピコ秒程度の非現実的な標準化間隔で動作するデジタル・アナログ変換器が必要になる。また、アナログ回路で生成できる一般化スプライン関数で表される直交スプラインウェーブレットは、残念ながら時間制限できない。

研究代表者は、直交スプラインウェーブレットがインパルス通信には不要な多重解像度解析という性質をもっていることに着目し、この性質を要求しなければ直交性と時間制限性を両立できると考えて、直交性と時間制限性だけをもつ一般化スプライン関数を高密度で送信する方式の理論的な枠組みを構築した。これは、科学研究費補助金(平成17~19年度)基盤研究C「カーディナルスプライン関数によるUWBパルス生成システム」(課題番号17560357)の成果である。パルスの生成は、階段状波形でアナログ連続時間システムを駆動することによって成される。また、米国FCC(Federal Communications Commission)が制定した放射電波強度の規制に合致し、1秒間に60億個伝送できる実用的なパルス波形の設計例、このパルスを用いる際のタイミング同期法も得られた。さらに、平成21年度には、科学技術振興機構のシーズ発掘試験研究の支援を受け、このパルス波形が現実に生成できることの原理実証試験を行った。

上記の枠組みは、実は、理論としては完成していなかった。与えられたアナログ連続時間システムによっては、パルス波形が複素数値になってしまう場合がある。常に実現可能な設計結果が得られるように、実現可能な実数の範囲で(問題1)パルス波形が存在するための必要十分条件を数学的に明らかにする。

また、実験的にも完成していなかった。理論では、送受信アンテナを含む伝送路の特性が、時間についての2階微分であると理想的に仮定している。平成21年度に製作した原理試験用パルス波形生成装置を用いて、(問題2)送受信アンテナを含む伝送路特性を同定する。この現実の特性と理想的仮定との相違の程度を評価し、(問題3)伝送路特性の補正を考慮したパルス波形の生成・検出システムを構築する。上記の3つの問題を目的とした。

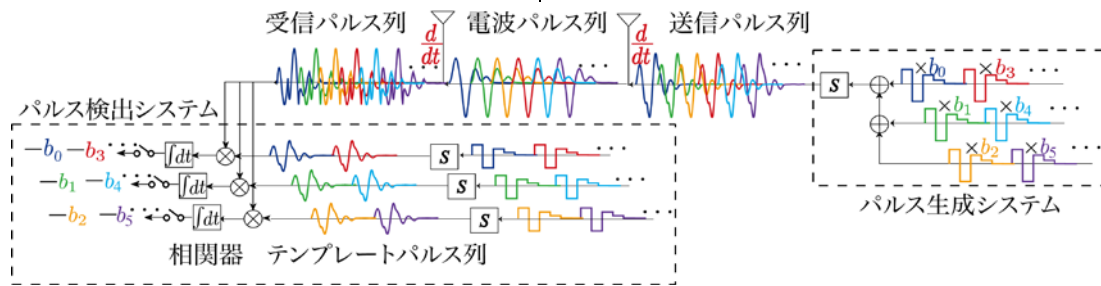


図1 互いに直交する一般化スプラインとして生成される時間制限パルスを高密度で送信する方式

### 3. 研究の方法

図1は、既に得られている一般化スプラインを高密度で送信する方式の理論的な枠組みの模式図である。広帯域アンテナの特性が、時間についての微分で近似できると知られているので、その特性は理想的に微分演算  $d/dt$  であると仮定されている。パルス生成システム(図中の右端)は、伝送すべきデータビット列  $\{b_i\}$  で重みづけた階段状波形をアナログ連続時間システム  $S$  に入力して送信パルス列を得る。送信パルス列は、送信アンテナで微分されて電波パルス列(図の中央)となる。先の階段状波形は、電波パルス列が互いに直交するように予め設計されている。電波パルス列は、受信アンテナで微分されて受信パルス列となる。部分積分の公式によって、送信パルスの1階微分である電波パルス同士の直交性は、送信パルスとその2階微分である受信パルスとの直交性に等価である。そこで、パルス検出システム(図中の左下)は、送信パルスと同じテンプレートパルス列を生成して、受信パルス列との内積をとる相関器へ入力する。相関器の出力が、電波パルス同士の直交性に基づく最小2乗推定の意味でのデータビット列の検出結果となる。

理論解析によって、(問題1)パルス波形が存在するための必要十分条件を数学的に明らかにする。現在の理論ではパルス生成フィルタ  $S$  の与え方によってパルス波形が複素数値になってしまう場合がある。理論解析によって、実数値パルス波形が存在するための必要十分条件を明らかにする。この条件式は、Daubechies ウェーブレットの直交条件式の各項に重み関数を掛けた形に変形できた。Daubechies ウェーブレットの場合には無条件に存在するが、本研究課題の場合には重み

関数についての条件となる。Daubechies の手法を参考にして、重み関数に含まれている  $S$  のダイナミカルパラメータに関する条件を導く。

具体的な送受信アンテナと低ノイズアンプを用意して、サンプリングオシロスコープで受信波形を計測し、(問題2)送受信アンテナを含む伝送路特性を同定する。アンテナは直流成分を伝達しないので、伝送路特性には2階微分  $d^2/dt^2$  の因子が含まれるはずである。そのため、何らかの線形動的システムを  $T$  として、 $T$  と2階微分  $d^2/dt^2$  との合成写像の形で伝送路特性を同定する。期待される結果は、伝送路特性が2階微分で近似できる、すなわち、 $T$  が恒等写像に近いことである。もしも、大きく異なっている場合には、アンテナの選択を再考して実験する。

伝送路特性が2階微分から大きく離れている場合には、(問題3)伝送路特性の補正を考慮したパルス波形の生成・検出システムを構築する。

### 4. 研究成果

理論的な成果として、(問題1)パルス波形が存在するための必要十分条件を数学的に明らかにした。パルス波形が存在するための必要十分条件を、パルス生成フィルタ  $S$  の動的パラメータに係る条件として明らかにできた。この条件が、サンプル値制御における可制御条件に類似していることがわかった。この条件下でパルスは実数値または複素数値になる。パルスが実数値になるための条件は  $S$  のパラメータではなく、設計過程で現れる特性関数に関する条件として明らかにできた。この条件を  $S$  のパラメータで表現するように解きほぐすことは大変困難であることがわかった。

実験的な研究では、まず、市販の広帯域アンテナを用いて、(問題2) 送受信アンテナを含む伝送路特性を同定した。その特性が低次の動的システムとしてモデル化できないことが明らかになった。このままでは、(問題3) 伝送路特性の補正を考慮したパルス波形の生成・検出システムを構築することへ進めないことが明白であったので、単純な微分系の特性をもつと期待される微小ループアンテナ対を設計・試作して、その特性を計測するアプローチに方針転換を行った。

図2に示される微小ループアンテナ対を設計して、電磁界シミュレーションを行った結果、このアンテナを送受信に用いたときに、設計例のパルス波形が主にエネルギーを持

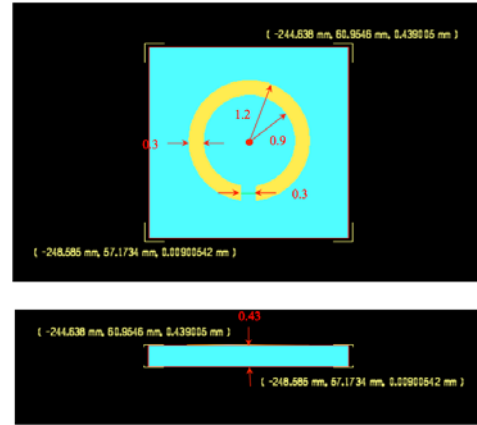


図2 微小ループアンテナ

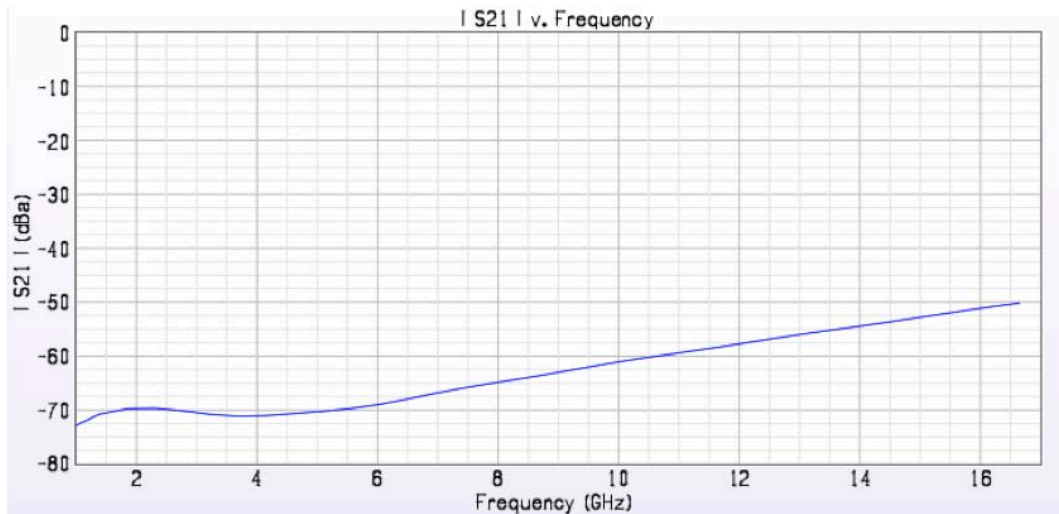


図3 微小ループアンテナ対の周波数特性

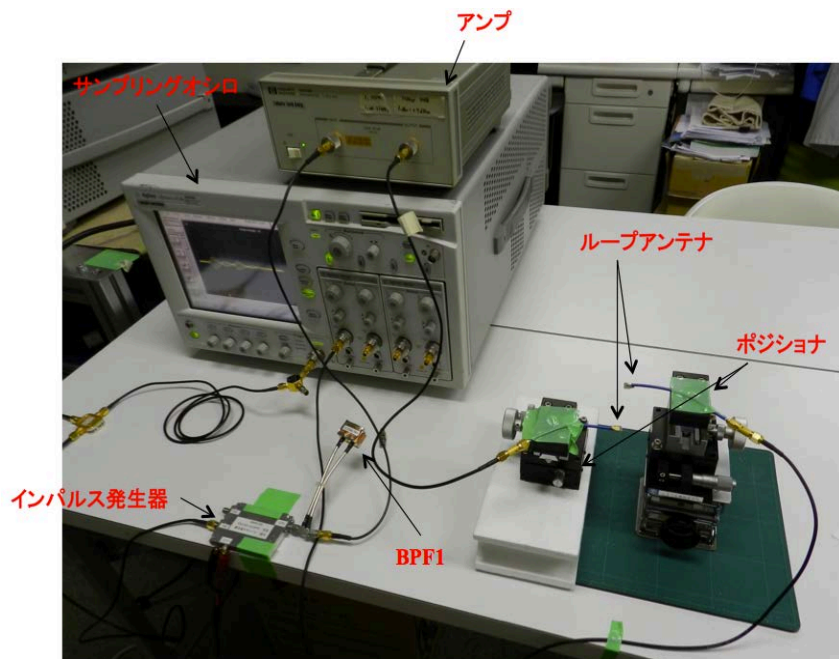


図4 製作した微小ループアンテナ対の特性計測

っている 4GHz~12GHz の範囲では 2 階微分特性を有することが示された。そのことは、図 3 の周波数特性が帯域内で振幅特性が 12dB/oct の傾斜をもっていることに表れている。このアンテナ対は、理論の根拠となっている理想のアンテナになっているので、これが利用できれば、(問題 3) 伝送路特性の補正を考慮したパルス波形の生成・検出システムを構築することは不要になった。

アンテナを製作して時間特性を実測したが、アンテナと駆動回路のインピーダンス整合が不十分であったため、反射波が生じてしまい、所望の特性を確認できなかった。

アンテナと駆動回路のインピーダンス整合を改善して、特性計測を行った。帯域内で 2 階微分特性に近い特性が観測された。図 4 は特性計測実験の様子の写真である。図 5 は、帯域が 4GHz~12GHz に制限されたテスト用波形をアンテナ対に給電して得られた受信波形を示している。利得は極めて小さかった。利得の改善が課題として残った。

以上の成果によって、本方式の理論的根拠が確立され、実験的な実現可能性の根拠も示された。これによって、互いに重なり合う高密度パルスを用いた極近距離高速デジタル無線通信システムの実現への道が開かれたといえる。この方式は、米国 FCC の規制のもとで、最大で 6Gbps (1 秒間にパルス 60 億個) の伝送速度を達成できる。この速度は、現行方式の最大速度 560Mbps の約 11 倍にあたる。

残る問題は、アンテナ利得の改善である。この問題は解決可能かどうか分からない。アンテナの研究は一般に指向性や周波数選択性を制約条件としながら、利得を高めることを目的として行われている。2 階微分特性をもつことを制約条件として高利得を狙うことは、極めて難しい問題設定となっている恐れがある。

逆にいえば、理論的な都合のために仮定した 2 階微分特性という新奇な目標がアンテナの研究に対して新しい問題を提示してい

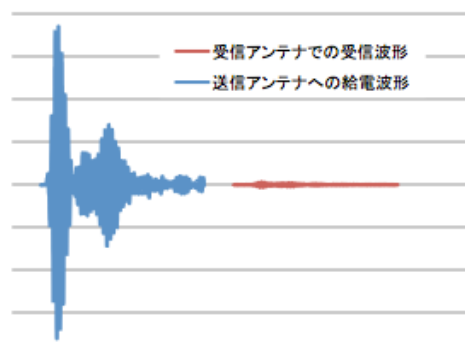


図 5 微小ループアンテナ対の  
給電波形と受信波形

るともいえる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① S. Mastumoto, M. Kamada and R.-O. Mijiddorj: Adaptive image interpolation by cardinal splines in piecewise constant tension, *Optimization Letters*, **6**(7), 1265-1280, 2012, 査読有.  
DOI:10.1007/s11590-011-0371-6.
- ② M. Kamada, S. Özlem and H. Habuchi: Orthogonal exponential spline pulses with application to impulse radio, *Sampling Theory in Signal and Image Processing*, **10**(1-2), 1-16, 2011, 査読有.  
<http://www.stsip.org/vol10/no1-2/toc.html>

[学会発表] (計 10 件)

- ① T. Miyashima, M. Kamada, R.-O. Mijiddorj and R. Enkhbat: Image data compression by compact wavelets orthogonal with respect to weighted Sobolev inner product, USB Proceedings of the International Conference on Sampling Theory and Applications 2011, Singapore, May 2011, 査読有.
- ② S. Mastumoto, M. Kamada, R.-O. Mijiddorj and R. Enkhbat: Image interpolation by cardinal splines in piecewise constant tension, USB Proceedings of the International Conference on Sampling Theory and Applications 2011, Singapore, May 2011, 査読有.
- ③ M. Kamada, S. Özlem and H. Habuchi: Orthogonal exponential spline pulses for impulse radio communications, Proceedings of the 36th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Glendale, Arizona, 1161-1166, Nov. 2010, 査読有.
- ④ S. Mastumoto and M. Kamada: Spline in piecewise constant tension with application to image interpolation, Abstract book, International Conference on Optimization, Simulation and Control, Ulaanbaatar, Mongolia, July 2010, 査読有.
- ⑤ M. Kamada: Double overlapping orthogonal pulses for high-speed communications, Abstract book, International Conference on Optimization, Simulation and Control, Ulaanbaatar, Mongolia, July 2010, 査読有.

[その他]

ホームページ等

<http://kamada.cis.ibaraki.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鎌田 賢 (KAMADA MASARU)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号：70204609